

УДК 621.383

## Фоточувствительность структур с квантовыми ямами, выращенных методом МОС-гидридной эпитаксии, при нормальном падении излучения

В. Б. Куликов, Г. Х. Аветисян, Л. М. Василевская  
ГУП НПП "Пульсар", Москва, Россия

И. Д. Залевский, И. В. Будкин, А. А. Падалица  
АО "Сигм-Плюс", Москва, Россия

*Показано, что основные успехи в области разработки приборов на основе структур с квантовыми ямами (СКЯ—QWS) связаны с использованием молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ). Однако наряду с МЛЭ в последнее время для выращивания СКЯ все больше используют газовую эпитаксию из металлоорганических соединений (МОСГЭ), обладающую большей производительностью, чем МЛЭ. Опыт работы с фотоприемниками (ФП) на основе СКЯ, выращенных методом МОСГЭ, показывает, что такие ФП обладают рядом отличий от аналогов из СКЯ, выращенных МЛЭ: более существенная несимметричность вольт-амперных характеристик (ВАХ), наличие значительной фоточувствительности при нормальном падении излучения без специальных устройств ввода. Указанные отличия связаны, на наш взгляд, с особенностями МОСГЭ. Представлены результаты экспериментального исследования ФП на основе СКЯ, полученных методом МОСГЭ; обсуждается их связь с особенностями СКЯ, обусловленными процессом МОСГЭ.*

До недавнего времени в публикуемых экспериментальных результатах по фотопроводимости ФП структур с СКЯ последние были выращены методом МЛЭ. Опыт исследования ФП СКЯ, выращенных методом МОСГЭ, показывает, что ФП таких СКЯ обладают рядом особенностей по сравнению с ФП СКЯ, выращенными МЛЭ. К таким особенностям следует отнести более существенную несимметричность ВАХ, наличие значительной фоточувствительности при нормальном падении излучения без специальных устройств ввода. Указанные особенности связаны с различиями в технологии выращивания СКЯ.

В настоящей работе представлены результаты экспериментального исследования ФП СКЯ, полученных методом МОС-гидридной эпитаксии (МОСГЭ); ниже обсуждается их связь с особенностями СКЯ, обусловленными процессом МОСГЭ.

### Экспериментальные образцы

Исследованные структуры выращивались методом МОСГЭ при давлении 65 мм рт. ст. и температуре  $\sim 700$  °С на полуизолирующих подложках GaAs с ориентацией  $\langle 100 \rangle$ . СКЯ содержали 50 периодов гетероструктур, в которых яма из

GaAs имела толщину  $50 \text{ \AA}$ , а барьер  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  ( $x = 0,24$ ) —  $450 \text{ \AA}$ . Ямы легировались кремнием до концентраций  $10^{18} \text{ см}^{-3}$ . Верхний и нижний контактные слои имели толщину 0,5 и 1 мкм, соответственно, и легировались до концентрации свыше  $10^{18} \text{ см}^{-3}$ .

Из выращенных структур с использованием химического травления изготавливались экспериментальные образцы фотосопротивлений (ФС) в виде мезы размером  $400 \times 400$  мкм. Специальные устройства ввода излучения в ФС типа дифракционной решетки отсутствовали. Омические контакты формировались посредством напыления через маску из фоторезиста сплава Au:Ge, взрыва напыленного слоя и последующего его вжигания. Полученные таким образом контакты покрывались пленками Ti и Al.

### Экспериментальные результаты

При исследованиях экспериментальных образцов ФС измерялись их ВАХ при различных температурах, спектры фоточувствительности и определялись зависимости абсолютной чувствительности в максимуме спектра от напряжения, зависимости шумового тока от напряжения. На основе полученных результатов рассчитывались

зависимости коэффициента фотоэлектрического усиления и обнаружительной способности ФС от напряжения и температуры. Спектры fotocувствительности измерялись на специализированном стенде на основе монохроматора МДР-41. Измерения абсолютной fotocувствительности ФС производились с помощью источника модулированного излучения, в котором излучателем является макет абсолютно черного тела (АЧТ) с температурой 573 К. Излучение модулировалось с частотой 1200 Гц. Сигналы и шумы ФС измеряли с помощью узкополосного усилителя с резонансной частотой 1200 Гц и шириной полосы пропускания 200 Гц. При этом образцы размещались в заливном криостате с возможностью откачки паров жидкого азота, обеспечивающем охлаждение образцов до 60 К. Перед образцами размещалась охлаждаемая диафрагма, обеспечивающая поле зрения в угле около  $25^\circ$ .

На рис. 1, а представлены ВАХ одного из образцов ФС, защищенных от фоновой засветки холодным экраном, на рис. 1, б — ВАХ того же образца при фоновой засветке. Правые ветви ВАХ соответствуют “—” напряжения питания на верхнем контакте ФС, т. е. направление поля совпадает с направлением роста СКЯ. ВАХ исследованных образцов были отчетливо асимметричны. Отметим, что для полярности напряжения питания, когда на верхнем контакте “+”, характерна более высокая чувствительность ФП при одном и том же значении напряжения.

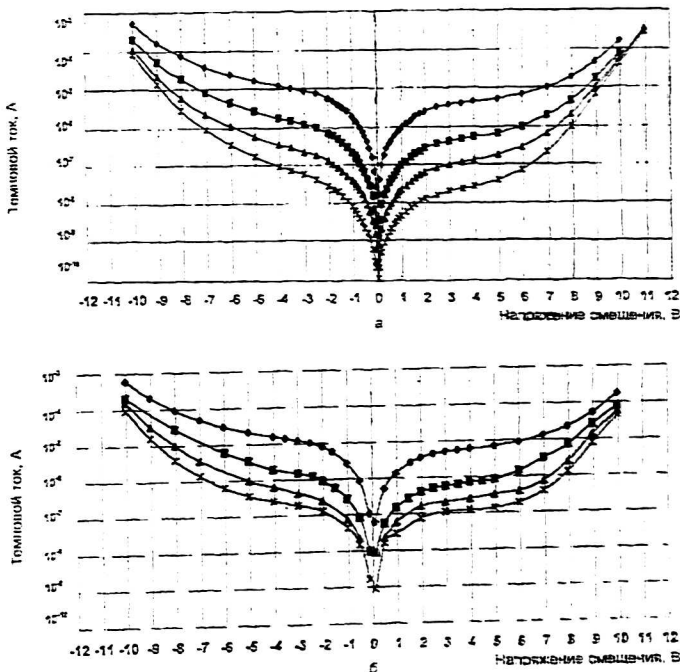


Рис. 1. Вольт-амперная характеристика тестового ФП:

а — с заслонкой; б — без заслонки;

—♦— —  $T = 78$  К; —■— —  $T = 70$  К; —▲— —  $T = 65$  К;  
—×— —  $T = 60$  К

На рис. 2 представлен спектр fotocувствительности, полученный при одной полярности напряжения (“+” на верхнем контакте ФС). Форма спектра и положение его максимума не испытывают существенных изменений с изменением температуры в интервале 60—77 К или напряжения на образце в интервале 1—4 В.

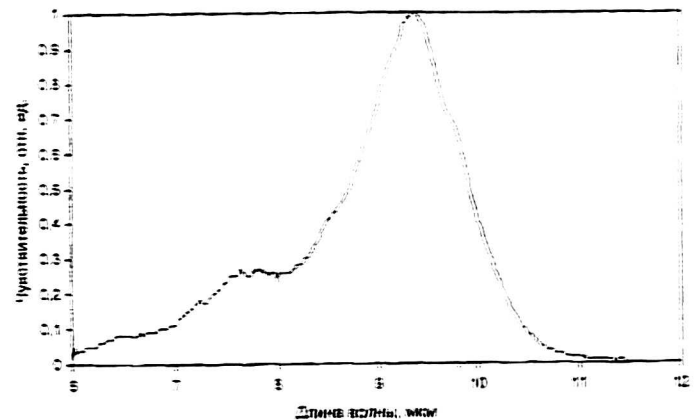


Рис. 2. Спектр fotocувствительности тестового ФП:  
 $T = 78$  К;  $U = 3$  В

На рис. 3 представлены зависимости абсолютной чувствительности одного из образцов ФС в максимуме спектра от напряжения питания при обеих его полярностях и различных температурах. Указанные зависимости получены с учетом коэффициента использования излучения от АЧТ, который рассчитывался посредством численного интегрирования спектра fotocувствительности (см. рис. 2). Помимо асимметрии этих зависимостей обращает на себя внимание абсолютное значение чувствительности, достигающее долей А/Вт. Столь значительная величина чувствительности получена на образцах ФС без специальных устройств ввода излучения при нормальном его падении по отношению к фронтальной поверхности ФС. На рис. 4 представлены зависимости шумового тока ФС от напряжения при двух его полярностях и различных температурах. На основе полученных зависимостей по известной формуле  $I_{ш} = (4eI_{т}g\Delta f)^{1/2}$  (где  $e$  — заряд электрона;  $I_{т}$  — темновой ток;  $g$  — коэффициент фотоэлектрического усиления;  $\Delta f$  — полоса частот, в которой регистрируется шум) определялись зависимости коэффициента фотоэлектрического усиления ФС от напряжения, представленные на рис. 5. Значение  $g$  находится в пределах 0.5—0.6, что является типичным для ФС, полученных из структур, выращенных МЛЭ, и говорит о неплохом качестве барьеров в исследуемых образцах.

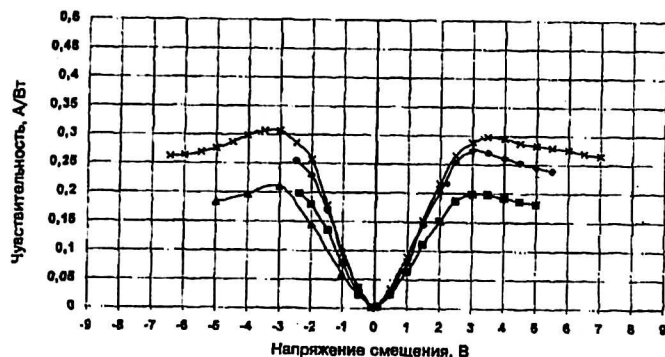


Рис. 3. Зависимость чувствительности от напряжения при различных температурах:

—♦— —  $T = 78$  К; —■— —  $T = 70$  К; —▲— —  $T = 65$  К;  
—×— —  $T = 60$  К

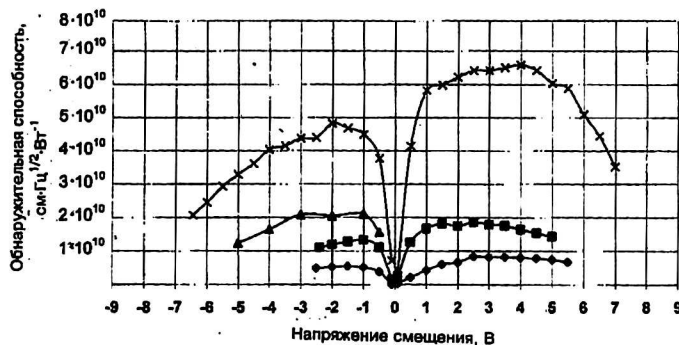


Рис. 6. Зависимость  $D^*$  от напряжения при различных температурах:

—♦— —  $T = 78$  К; —■— —  $T = 70$  К; —▲— —  $T = 65$  К;  
—×— —  $T = 60$  К

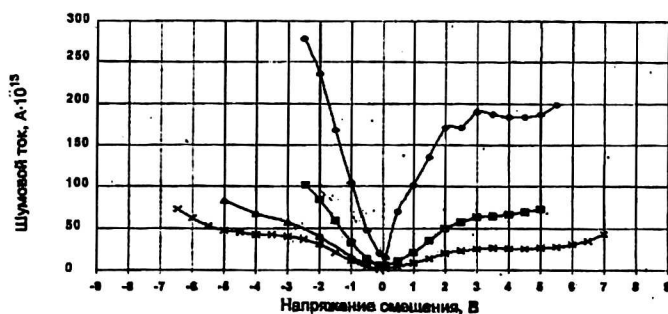


Рис. 4. Зависимость шумового тока от напряжения при различных температурах:

—♦— —  $T = 78$  К; —■— —  $T = 70$  К; —▲— —  $T = 65$  К;  
—×— —  $T = 60$  К

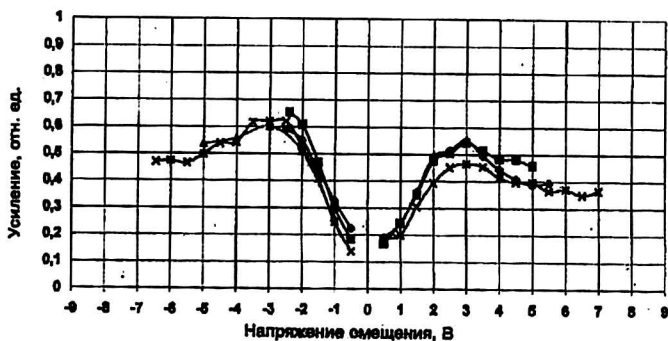


Рис. 5. Зависимость коэффициента фотоэлектрического усиления  $\Phi C$  от напряжения при различных температурах:

—♦— —  $T = 78$  К; —■— —  $T = 70$  К; —▲— —  $T = 65$  К;  
—×— —  $T = 60$  К

### Обсуждение результатов

На основании полученных результатов можно заключить, что исследованные образцы СКЯ имеют квантовые ямы, которые не являются симметричными. Последнее утверждение может быть сделано хотя бы на основании того, что ВАХ и зависимости чувствительности от напряжения являются асимметричными. Аналогичные результаты были получены на СКЯ, выращенных методом МЛЭ, с ямами, изготовленными асимметричными специально [1]. В указанной работе показано также, что при направлении внешнего поля в сторону более резкой границы асимметричной ямы наблюдаются большая чувствительность и большие токи ВАХ при одном и том же напряжении, чем при противоположной полярности. Асимметрия границ ямы может приводить к различию в коэффициентах надбарьерного отражения носителей и, как следствие к различию коэффициентов фотоэлектрического усиления при разных полярностях внешнего напряжения. Учет этих результатов при анализе зависимостей на рис. 1 и 3 позволяет сделать предположение, что начальные границы барьеров являются более пологими, чем конечные.

Остановимся теперь на эффекте anomalно большой чувствительности  $\Phi C$  при нормальном падении излучения при отсутствии специальных устройств ввода. Ее величина, как известно, зависит от двух факторов:  $g$  и  $\eta$  — квантовой эффективности. Значения  $g$ , как отмечалось выше, не являются anomalно большими. Оценка  $\eta$  из формулы для чувствительности  $\Phi C$ :  $R_{\lambda \max} = (e/h\nu)\eta g$  дает величину  $\eta$  свыше 8%. В обычных  $\Phi C$  на основе СКЯ, выращенных МЛЭ, при нормальном падении излучения величина  $\eta$  существенно меньше. Наличие значительной квантовой эффективности отражается и на значениях

На рис. 6 представлены зависимости обнаружительной способности  $\Phi C - D^*_{\lambda \max}$  от напряжения при различных температурах. Величина  $D^*_{\lambda \max}$  рассчитывалась на основе результатов измерения абсолютной чувствительности и шумового тока (см. рис. 3, 4).

обнаружительной способности, которые также оказались неожиданно большими по сравнению с типичными значениями для СКЯ без устройств ввода излучения (см. рис. 6).

Заметное повышение квантовой эффективности ФС на основе СКЯ, выращенных МЛЭ, при нормальном падении излучения достигалось в случаях, когда СКЯ выращивались на подложках с ориентацией, при которой тензор эффективной массы имеет недиагональные члены, т. е. когда импульс электрона, взаимодействующего с электрическим полем электромагнитной волны, направленным вдоль плоскости ямы, имеет составляющую, перпендикулярную слоям СКЯ [2]. В нашем случае все подложки, на которых выращивались СКЯ, имели ориентацию  $\langle 100 \rangle$ , что не должно приводить к появлению указанных эффектов.

Наличие заметной фоточувствительности в наших СКЯ при нормальном падении излучения можно было бы объяснить действием боковой поверхности мезы ФС как своеобразной призмы, выполняющей функцию устройства ввода. Однако оценки, сделанные на основе сопоставления площадей боковой и фронтальной поверхностей мезы, показывают, что для реализации полученной чувствительности (в несколько десятых долей А/Вт) СКЯ должна обладать временем жизни неравновесных носителей свыше  $10^{-8}$  с либо квантовой эффективностью свыше 100 %. Измерения шумов не подтвердили ни одно из указанных предположений. Заметим, что обратная сторона подложек ФС, которая при плохой обработке могла бы рассеивать сигнальное излучение и служить устройством ввода, в нашем случае была полированной.

Для объяснения полученного результата обратим внимание на следующее обстоятельство. Слабое поглощение излучения при его нормальном падении наблюдается, как правило, в СКЯ, выращенных методом МЛЭ. Такие СКЯ в наибольшей степени соответствуют модели прямоугольных и симметричных ям, положенной в основу теории, объясняющей это явление. Однако для непрямоугольных асимметричных ям такая теория не разработана. Между тем, как показано в работе [3], отклонения формы ям от симметричной могут существенно влиять на поляризационную зависимость поглощения излучения в СКЯ. В случае СКЯ, выращенных методом МОСГЭ, возможно существенное отклонение формы реальных ям от классической модели. Возникновение асимметрии в резкости границ яма — барьер может быть связано с особенностями процесса МОСГЭ. В МОСГЭ газо-

вые реагенты имеют более высокое давление, более высокую вязкость, что может приводить к более продолжительным переходным процессам при переключении газовых потоков и, как следствие, к более существенным, чем в случае МЛЭ, отклонениям формы ямы от прямоугольной и симметричной. Как отмечалось выше, процессы МОСГЭ проходят при температурах свыше  $700^\circ\text{C}$ . При этих температурах диффузия кремния, которым обычно легируют ямы, становится весьма существенной [4], т. е. независимо от начального положения области легирования по окончании процесса роста профиль распределения примеси не будет локализован в пределах ямы. Иначе говоря, во всех исследованных структурах независимо от места введения примеси она будет присутствовать и в ямах, и в барьерах. Это приводит к тому, что при охлаждении до криогенных температур примесь в барьерах будет ионизована, поскольку электроны перейдут на уровни в ямах, и на границе ям и барьеров возникнет встроенное поле. Приближенные оценки показывают, что величина поля может достигать  $10^5$  В/см. Такое поле могло бы вызывать деформацию изначально прямоугольной и симметричной ямы и, как следствие, приводить к появлению заметного поглощения излучения при нормальном падении. О возможности такого влияния электрического поля на механизмы поглощения излучения в СКЯ указывалось в работах [3, 5]. Обсуждаемый эффект существенно слабее выражен в СКЯ, полученных МЛЭ, поскольку практически всегда в них легируют середину ямы, и при температурах роста  $\sim 500^\circ\text{C}$  примесь не успевает продифундировать в барьеры.

Выводы, сделанные на основе проведенного выше анализа причин появления аномально высокой чувствительности, а также других особенностей ФС на основе СКЯ, выращенных методом МОСГЭ, имеют в основном характер предположений. Поэтому для установления истинных причин описанных явлений требуются дальнейшие исследования.

### Заключение

Проведено исследование характеристик фотоприемников на основе СКЯ, выращенных методом МОСГЭ. Анализ экспериментальных ВАХ, зависимостей абсолютной чувствительности от напряжения, спектров фоточувствительности дают основания полагать, что ямы в СКЯ являются несимметричными. Неожиданным результатом явилось наличие весьма значительной

фоточувствительности в ФС на основе СКЯ при нормальном падении излучения, хотя никаких специальных устройств ввода излучения ФС не имели. Проведен анализ возможных причин наблюдаемых явлений. Установление их физической природы, а также получение более детальной информации о структурных особенностях СКЯ, полученных методом МОСГЭ, требуют дальнейших исследований.

#### Литература

1. Brandel A., Fraenkel A., Bahir G. et al.// Semicond. Sci. Technol. 1993. V. 8. S. 412—416.
2. Zhang Y., Baruh N., Wang W. I.// Electr. Lett. 1993. V. 29. N 2. P. 213—214.
3. Hagston W. E., Stirner T., Rasul F.// J. Appl. Phys. 2001. V. 89. N 2. P. 1087—1100.
4. Deppe D. G., Holonyak N. // Ibid. 1988. V. 64. N 12. R93—R113.
5. Шук А. Я. // ФТП. 1986. Т. 20. №. С. 1598—1603.

## Photosensitivity of quantum well structures, brought up by a method of the OMC-hydride epitaxy, at a normal slope of radiation

V. B. Kulikov, G. Kh. Avetisyan, L. M. Vasilevskaya  
PULSAR Scientific & Production Enterprise, Moscow, Russia

I. D. Zalevsky, I. B. Budkin, A. A. Padalitsa  
SIGM-PLUS, Inc., Moscow, Russia

*Basic successes in the field of development of devices on the basis of quantum well structures (QWS) are bound to usage of the molecular-beam epitaxy (MBE). However recently the gas eputaxy from organometallic compounds (GEOMC) will ever more be utillized. It has the greater productivity than the MBE. Our experience with photodetectors (PD) on the basis of the QWS brought up by a method of the GEOMC displays that such PD have a series of differences from analogs from the QWS brought up by MBE. Sush differences are more essential asymmetry of a volt-ampere characteristic, a presence of a considerable photosensitivity at normal slope of radiation without the special fittings of the input. The indicated differences are bound, on our view, to features of the GEOMC. The results of experimental examination of the PD on the QWS dasis, which ones are obtained by method of the GEOMC, are submitted in this work. Considered is their connection with features of the QWS stipulated by process of the GEOMC.*